

Współfinansowane ze  
środków Unii Europejskiej

DOI: 10.5604/20830157.1176581

## ZASTOSOWANIE MATRYCY PÓLPRAWODNIKOWYCH CZUJNIKÓW GAZU DO CIĄGŁEGO MONITORINGU POPRAWNOŚCI PROCESU OCZYSZCZANIA ŚCIEKÓW

**Łukasz Guz**

Politechnika Lubelska, Zakład Jakości Powietrza Zewnętrznego i Wewnętrznego

**Streszczenie.** Urządzenia z matrycą złożoną z różnych czujników gazu, nazywane również elektronicznym nosem, umożliwiają wyznaczenie dla badanego gazu unikalnego wzoru sygnałów (ang. gas fingerprint). W ściśle określonych warunkach można go skorelować z wieloma parametrami fizyko-chemicznymi badanych próbek gazowych, jak również cieczy z fazą nadpowierzchniową. Matrycę złożoną z ośmiu półprzewodnikowych rezystancyjnych czujników gazu typu MOS wykorzystano do kontroli poprawności procesu oczyszczania ścieków, prowadzonego w półautomatycznym laboratoryjnym reaktorze SBR. Probki powietrza pobierane były nad zwierciadłem ścieków z zamkniętej komory reaktora a następnie pozbawiane wilgoci za pomocą osuszacza z rurką nafionową. Do analizy wielowymiarowych wyników pomiarów zastosowano sztuczne sieci neuronowe (SSN), klasyfikujące stany procesu. Wyniki badań wykazały wysoką przydatność matrycy czujników MOS oraz SSN do ciągłej kontroli poprawności prowadzonego procesu. W przypadku podłączenia urządzenia do sieci komputerowej możliwy jest wgląd w stan procesu z dowolnego miejsca.

**Słowa kluczowe:** ścieki, elektroniczny nos, matryca czujników, sztuczne sieci neuronowe

## ЗАСТОСУВАННЯ МАТРИЦІ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДАТЧИКІВ ГАЗУ ДЛЯ БЕЗПЕРЕРВНОГО КОНТРОЛЮ РЕГУЛЯРНОСТІ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

**Анотація.** Пристрої з матрицею, яка складається з різних газових датчиків, звані також електронічний ніс, дозволяють визначити для досліджуваного газу унікальний зразок сигналів (анг. gas fingerprint). У конкретних умовах можна його співвіднести з низкою фізико-хімічних параметрів досліджуваних зразків газу, а також з рідиною із фазою вільного простору. Матриця складається з вісьми напівпровідникових резистивних газових датчиків типу MOS, використовуються для контролю точності процесу очищення стічних вод, який проводиться в напівавтоматичному лабораторному реакторі SBR. Проби повітря були зібрані над поверхнею стічних вод з закритої камери реактора, а потім позбавлені вологи за допомогою осушувача з трубкою нафлон. Для аналізу багатовимірних оцінок вимірів використовуються штучні нейронні мережі (ШНМ), які класифікують стан процесу та оцінюють значення постійно вибраних параметрів якості стічних вод. Результати досліджень показали високу користь матриці MOS і ШНМ для безперервного моніторингу правильності проведеного процесу. При підключенні пристрою до комп'ютерної мережі можна побачити стан процесу з довільного місця.

**Ключові слова:** SBR, матриця датчиків, MOS, е-ніс, ШНМ

## APPLICATION OF SEMICONDUCTOR GAS SENSORS ARRAY FOR CONTINUOUS MONITORING OF SEWAGE TREATMENT PROCESS REGULARITY

**Abstract.** Devices with a array composed of various gas sensors, also called electronic noses, allow to determine the unique pattern of signals (gas fingerprint) for the analyzed gas samples. When the strict measurement conditions are obeyed, signals can be correlated with several physico-chemical parameters of the gas samples, as well as liquids with a headspace phase. The array composed of eight MOS type resistive semiconductor gas sensors was used to control wastewater treatment process regularity, conducted in semi-automated laboratory SBR reactor. Gaseous phase was sampled above the wastewater surface in closed reactor chamber and afterward dehumidified using a nafion tube dryer. For the analysis of multidimensional data there were used artificial neural networks (ANN) which evaluated the status of the process. The research results revealed high usefulness of MOS sensors and SSN for continuous monitoring of wastewater treatment process regularity. In case of the devices connected to world wide web, there is a possibility of remote viewing of the process status.

**Keywords:** wastewater, electronic noses, sensor arrays, artificial neural networks

### Wstęp

Do kontroli jakości oczyszczonych ścieków wykorzystuje się wskaźniki takie jak biologiczne zapotrzebowanie na tlen (BZT<sub>5</sub>), chemiczne zapotrzebowanie na tlen (ChZT), odczyn (pH), szybkość zużycia tlenu (OUR), zawartość zawiesin ogólnych (Zog), zawartość ogólnego węgla organicznego (OWO), zawartość związków fosforu i azotu [2, 3]. Pozwalają one ocenić czy oczyszczone ścieki spełniają wymagania normatywne. Jednak ich wykorzystanie do ciągłego monitoringu jest utrudnione, co jest związane przede wszystkim z czasochłonnością wykonania (np. BZT<sub>5</sub>), jak również złożonością procedur. Dodatkowo agresywne wodne środowisko ścieków nie sprzyja trwałości zastosowanych sond pomiarowych. W pomiarach powyższych parametrów można zastosować prawo Henry'ego mówiące, iż w danej temperaturze stężenie zanieczyszczeń powietrza w fazie gazowej jest proporcjonalne do stężenia zanieczyszczeń w cieczy. Wykonując pomiar fazy lotnej czujnikami gazu można szacować stężenie

### Вступ

Для контролю якості очищеної стічної води використовуються такі показники, як біологічне споживання кисню (БСК<sub>5</sub>), хімічна потреба в кисні (ХПК), реакція (pH), швидкість споживання кисню (ШСК), вміст завислих речовин (ВЗР), загальний вміст органічного вуглецю (ВОВ) вміст фосфору й азоту [2, 3]. Вони дозволяють оцінити, наскільки очищення стічних вод відповідає вимогам стандарту. Проте, важко їх застосовувати для безперервного моніторингу, що пов'язано в першу чергу, з великою кількістю часу при використанні (наприклад, БСК<sub>5</sub>), а також зі складністю процедури. Крім того, агресивне водне середовище стічних вод не сприяє стійкості, використовуваних вимірювальних зондів. При вимірюванні цих параметрів можуть бути використані закони Генрі, які говорять про те, що з урахуванням температури, концентрація забруднюючих повітря речовин в газовій фазі є пропорційна концентрації домішок

nie zanieczyszczeń w ściekach. Czujniki gazów stosowane w analizach nie są doskonale selektywne na pojedyncze związki chemiczne i nie umożliwiają dokładnej analizy jakościowej i ilościowej, jak to jest w przypadku chromatografii. Pojedyncze czujniki nie zdają egzaminu, ponieważ dany sygnał może być wygenerowany przez różne próbki gazowe. Zastosowanie matrycy wielu czujników pozwala utworzyć praktycznie niepowtarzalny wzór sygnałów, umożliwiający precyzyjne rozróżnienie badanych próbek. Wykorzystywane w tym celu czujniki gazów powinny być wyczułone na różne grupy zanieczyszczeń [8]. Najczęściej wykorzystywane są rezystancyjne półprzewodnikowe czujniki tlenkowe (MOS), polimery przewodzące (CP), mikrowagi kwarcowe (QCM) lub czujniki z powierzchniową falą akustyczną (SAW) [1]. Poszczególne procesy oczyszczania powodują powstanie typowych dla nich mieszanin związków zanieczyszczających, wskazujących na poprawność procesu. Wystąpienie nietypowego profilu zanieczyszczeń świadczy o zakłóceniach procesu oczyszczania. Ze względu na praktycznie nieograniczoną ilość mieszanin gazowych nie jest możliwe zbudowanie dla nich kompletnej bazy danych. W takim przypadku grupują się podobne zanieczyszczenia powietrza w klasy. Przynależność do poszczególnych klas można rozpatrywać jako podobieństwo geometryczne sygnałów.

Urządzenia z matrycą czujników gazu wykorzystywane były do wykrywania przypadkowych lub nielegalnych zrzutów odpadów płynnych do sieci kanalizacyjnych [4]. Pozwoliły na identyfikację ścieków ze względu na miejsce ich powstawania w oczyszczalni [5, 15]. Inne badania udowodniły, iż możliwe jest szacowanie parametrów takich jak BZT<sub>5</sub>, siarkowodor, ChZT i Zog czy lotne związki organiczne [5, 6, 11, 12, 15]. Zadowalające wyniki uzyskano również odnośnie stężenia zapachowego [15].

Często wykorzystywaną techniką interpretacji danych wielowymiarowych są sztuczne sieci neuronowe (SSN). Stopień skomplikowania architektury sieci zależy głównie od liczby wejść (czujników) oraz stopnia złożoności relacji wyjście-wyjście informacji. Gdy szukane relacje nie są skomplikowane, zadowalające wyniki są otrzymywane przy zastosowaniu jednej warstwy neuronów ukrytych [7]. W przeciwnym wypadku uzasadnione jest użycie dwóch lub więcej warstw ukrytych. Zgodnie z sugestią, liczba neuronów ukrytych nie powinna być mniejsza niż  $2n+1$ , gdzie  $n$  jest to liczba sygnałów wejściowych [9]. W innych badaniach opisywanych w publikacjach naukowych, liczba neuronów ukrytych nie przekraczała 35 [10, 12, 14]. Jako funkcje aktywacji neuronów ukrytych wykorzystywane najczęściej są logistyczna sigmoidalna i tangens hiperboliczny a dla neuronów wyjściowych funkcja liniowa.

## 1. Materiały i metody

Stanowisko laboratoryjne wykorzystane podczas badań przedstawione jest na rys. 1. Proces oczyszczania ścieków (redukcji stężenia substancji organicznych i biogenów takich jak związki węgla, azotu i fosforu) przeprowadzony był w laboratoryjnym półautomatycznym reaktorze SBR, oczyszczającym ścieki metodą osadu czynnego i pracującym podczas opisywanego eksperymentu w cyklu 12-godzinnym.

W jednym cyklu oczyszczania można wyróżnić następujące fazy: dodanie nieoczyszczonych ścieków i przerwa, mieszanie, napowietrzanie z mieszaniem, napowietrzanie cykliczne z mieszaniem, sedymentacja i dekantacja, podczas której czujniki były przeczyszczane czystym powietrzem). Ścieki oczyszczane w bioreaktorze podczas badań pobierane były z osadnika wstępnego miejskiej oczyszczalni ścieków, gdzie dzienny strumień ścieków  $Q_d$  wynosi 60 000 m<sup>3</sup>/d.

u rідині. Вимірюючи датчиками газу летючу фазу, можна оцінити концентрацію забруднюючих речовин у стічних водах. Газові датчики, використовувані при аналізі не є ідеальними відносно окремих з'єднань і не дозволяють зробити точний якісний і кількісний аналіз, як і у випадку хроматографії. Індивідуальні датчики не працюють ефективно, тому що сигнал може бути викликаний різними пробами газу. Використання матриці з кількома датчиками дозволяє створювати практично унікальний зразок сигналів, що дозволяє точне розрізнення досліджуваних зразків. Використовувані для цієї мети датчики газу повинні бути чутливі до різних груп домішок [8]. Найбільш часто використовуються резистивні кисневі датчики (MOS), провідні полімери (ПП), кварцевий мікробаланс (KM) або наземні датчики з акустичною хвилею (SAW) [1]. Окремі процеси очищення призводять до утворення типових для них профілів забруднень, що вказують на правильність процесу. Виникнення нестандартного профілю показує, порушення процесу очищення. Через практично необмежену кількість газових сумішей, не можливо для них, створити повну базу даних. У цьому випадку, групуються подібні забруднення повітря в класи. Приналежність до конкретного класу можна розглядати, як геометричну подібність сигналів.

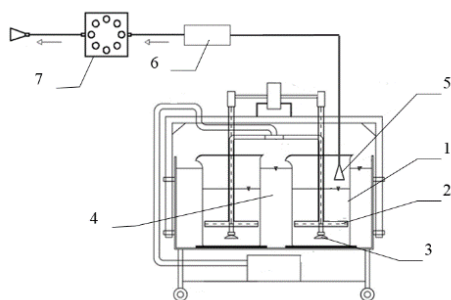
Пристрої з матрицею датчиків газу були використані для виявлення випадкових або незаконних скидів рідких відходів в каналізаційні мережі [4]. Дозволили ідентифікувати стічні води в залежності від місця їх утворення в очищувальній системі [5, 15]. Інші дослідження показали, що можна оцінити такі параметри стічних вод, як БСК<sub>5</sub>, сірководень, ХПК і ВЗР або леткі органічні сполуки [5, 6, 11, 12, 15]. Добрі результати були отримані щодо концентрації запаху [15].

Часто використовується метод багатовимірної інтерпретації даних, штучні нейронні мережі (ШНМ). Складність мережевої архітектури залежить, в основному, від кількості входів (датчиків) і складності вихідного виводу інформації. Коли пошук в їх відносинах нескладний, то потрібні результати виходять при використанні одного шару прихованих нейронів [7]. В іншому випадку, потрібно використовувати два або більше прихованих шарів. Число прихованих нейронів не повинно бути менше, ніж  $2n + 1$ , де  $n$  є число входних сигналів [9]. В інших дослідженнях, представлених у наукових публікаціях, кількість прихованих нейронів не перевищує 35 [10, 12, 14]. В функції активатора прихованих нейронів, найчастіше використовуються логістична сигмоїда і гіперболічний тангенс, а для вихідних нейронів лінійна функція.

## 1. Матеріали та методи

Лабораторія, яка використовується під час випробувань показаних на мал.1. Очищення стічних вод (зменшення концентрації органічних речовин і біогенів, таких як вуглець, азот і фосфор) проводили в лабораторному напівавтоматичному реакторі SBR, який очищує стічні води методом осаду, що працює під час описаного експерименту, в 12-годинному циклі.

Одному циклі очищення можна виділити наступні етапи: додавання неочищеної води і перерва, змішування, аерація з перемішуванням, циклічна аерація при перемішуванні, осадження осаду, продувка датчиків (при декантуванні камер реактора). Очищена стічна вода в біореакторі в ході дослідження була зібрана з відстійної муніципальної станції очистки стічних вод, де щоденний потік стічних вод  $Q_d$  є 60 000 м<sup>3</sup>/д.



Rys. 1. Schemat stanowiska laboratoryjnego: 1 – komora bioreaktora SBR, 2 – mieszadło, 3 – napowietrzacz, 4 – temperaturowo stabilizowana kąpiel, 5 – punkt poboru próby gazowej, 6 – osuszacz nafionowy, 7 – matryca czujnikowa 8×MOS  
 Мал. 1. Схема лабораторії: 1 – камера біореактора SBR, 2 – мішалка, 3 – аератор, 4 – термостабілізована ванна, 5 – газова точка відбору проб, 6 – нафлон осушувач, 7 – матричні датчик 8×MOS

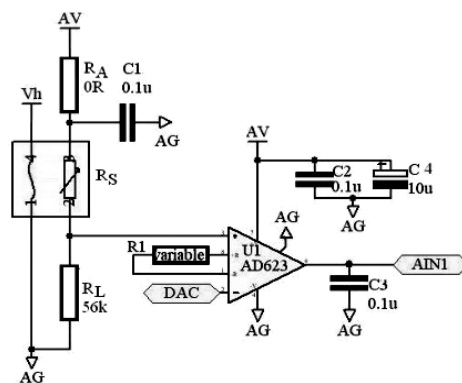
Próbki gazu pobierane były nad zwierciadłem ścięków w zamkniętej komorze bioreaktora w ilości 200 cm<sup>3</sup>/min. Pozbawiane były wilgoci za pomocą osuszacza DM-110-24 Perma Pure z rurką nafionową i żelem krzemionkowym. Pomiar wykonywano za pomocą matrycy złożonej z ośmiu czujników MOS. W celu pomiaru warunków środowiskowych zamontowany został również czujnik temperatury Maxim-Dallas DS18B20 i czujnik wilgotności względnej Honeywell HIH-4000. Pomiar prowadzono w trybie ciągłym przez 60 dni z częstotliwością odczytów co sekundę.

Podczas wyboru czujników zostały wzięte pod uwagę następujące kryteria: I) liczba czujników nie powinna przekraczać 10 szt. – niższe koszty ułatwią wykonanie wielu egzemplarzy, co umożliwi powszechne stosowanie układu pomiarowego; II) czujniki nisko selektywne; III) czujniki gazu powszechnie dostępne w większości krajów oraz sprawdzone w rozwiązaniach podobnego typu; IV) względnie niski pobór prądu – możliwość zastosowania w urządzeniu przenośnym; V) wszystkie czujniki w matrycy tego samego typu. Rozpatrując powyższe kryteria wybranych zostało 8 rezystancyjnych półprzewodnikowych czujników gazu typu TGS Figaro serii 2600: TGS2600-B00, TGS2602-B00, TGS2610-C00, TGS2610-D00, TGS2611-C00, TGS2611-E00, TGS2612-D00, TGS2620-C00. Są to czujniki o niewielkich wymiarach (obudowa TO-5) i zużyciu mocy do 300mW. Niski koszt czujników, powszechność i niezawodność sprawiły, że prowadzono wiele badań z ich wykorzystaniem. Stwarza to dobry grunt do porównywania wyników. Szczegółowe informacje na temat czujników można znaleźć w specyfikacji technicznej poszczególnych typów lub w instrukcji producenta [16].

Pomiar za pomocą czujników typu MOS polega na rejestrowaniu zmian oporu elementu sensorycznego w czujnikach (rys. 2). Zgodnie z zalecanymi schematami aplikacyjnymi producentów, należy mierzyć napięcie wyjściowe w rezystancyjnym dzielniku napięcia, złożonym z elementu sensorycznego czujnika  $R_S$  i opornika obciążenia  $R_L$  podłączonego do masy obwodu. Następnie opór elementu sensorycznego czujnika wyznacza się zgodnie ze wzorem:

$$R_S = R_L \frac{V_C - V_{OUT}}{V_{OUT}} \quad (1)$$

gdzie:  $R_S$  – rezystancja elementu sensorycznego czujnika [kΩ],  $R_L$  – rezystancja opornika obciążenia [kΩ],  $V_C$  – napięcie wejściowe dzielnika [V],  $V_{OUT}$  – napięcie wyjściowe dzielnika [V]. Sygnał z napięciem wyjściowym dzielnika  $V_{OUT}$  każdego z czujników przetwarzany jest poprzez nisko szumowe wzmacniacze instrumentalne AD623, w tym zastosowaniu pełniących funkcje buforów o wzmacnieniu równym jeden. Sygnał włączony jest do wejścia nieodwracającego wzmacniacza, a do wejścia odwracającego podłączony jest sygnał z przetwornika cyfrowo-analogowego DAC. W zależności od wielkości napięcia z dzielnika, odpowiednioysterowanie przetwornika DAC pozwala uzyskać niewielkie napięcie różnicowe (AIN1), które następnie mierzone jest z wysoką rozdzielczością poprzez przetwornik analogowo-cyfrowy o wąskim zakresie unipolarnym. Role przetworni-



Rys. 2. Układ przetwarzania sygnału czujnika  
 Мал. 2. Ланцюг обробки сигналу датчика

Зразки газу збирали над стічними водами в закритій камері біореактора 200 см<sup>3</sup>/хв. Зразки були позбавлені вологи за допомогою осушувача DM-110-24 Perma Pure з нафлон трубкою і силікагелем. Вимірювання проводили з використанням матриці, що складається з восьми датчиків MOS. Для вимірювання умов навколишнього середовища також встановлений був датчик температури Maxim-Dallas DS18B20 і датчик відносної вологості Honeywell HIH-4000. Вимірювання проводили безперервно протягом 60 днів із зняттям показників щосекунди.

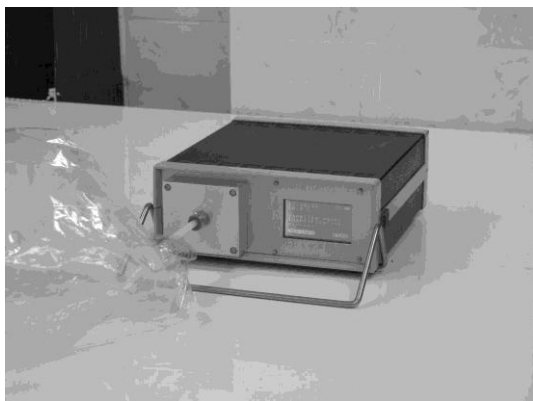
При виборі датчиків були прийняті до уваги такі критерії: I) кількість датчиків не повинна перевищувати 10 – з меншими витратами простіше зробити багато копій, що дозволить ширше застосування вимірювальної системи; II) селективні датчики з низьким рівнем; III) газові сенсори зазвичай доступні в більшості країн і перевірені в вирішенні завдань подібного типу; IV) відносно низьке споживання електроенергії – можливість використання в переносному пристрої; V) всі датчики в матриці того ж типу. Враховуючи вищевказані критерії були обрані 8 резистивних напівпровідникових датчиків газу TGS Figaro серії 2600: TGS2600-B00, TGS2602-B00, TGS2610-C00, TGS2610-D00, TGS2611-C00, TGS2611-E00, TGS2612-D00, TGS2620-C00. Це датчики з малими розмірами (корпус TO-5), з потужністю до 300 мВт. Низька ціна датчиків, універсальність і надійність стали причиною того, що проводиться багато досліджень з їх використанням. Це створює добру основу для порівняння результатів. Детальну інформацію про датчики можна знайти в технічній специфікації окремих видів або в інструкції виробника „General information for TGS sensors” [16].

Вимірювання за допомогою датчика MOS полягає в реєстрації змін опору чутливого елемента в датчику (мал. 2). Відповідно до рекомендованих схем виробників потрібно мати вихідну напругу в резистивному подільнику напруги, що складається з чутливого елемента датчика  $R_S$  і навантажувального резистора  $R_L$  підключено до ланцюга. Потім, опір чутливого елемента датчика визначається за формулою:

де  $R_S$  – стійкість чутливого елемента датчика [kΩ],  $R_L$  – стійкість навантажувального резистора [kΩ],  $V_C$  – вхідна напруга дільника [V],  $V_{OUT}$  – вхідна напруга дільника [V]. Сигнал з вихідною напругою дільника  $V_{OUT}$  кожного з датчиків обробляється низькошумовими підсилювачем AD623, при використанні виконують функцію буферів з коефіцієнтом посилення, рівним одиниці. Сигнал є включений до входу не інвертованого підсилювача, а до входу інвертованого підключений сигнал з перетворювача цифро-аналогового DAC. Залежно від розміру напруги з розподільника, відповідне налаштування DAC дозволяє отримати невелику диференційну напругу (AIN1), яка потім вимірюється з високою роздільною здатністю, за допомогою аналого-цифрового перетворювача з однополярним вузьким

ka ADC pełni mikrokontroler ADuC847, posiadający 8 multiplexowanych wejść 24-bitowego przetwornika. Przetwornik ADC ustawiany jest na następujące zakresy: 20mV, 40mV, 80mV, 160mV, 320mV, 640mV, 1,28V i 2,56V.

Matryca czujników gazu wraz z układem przetwornikowym stanowi główny element przenośnego analizatora zanieczyszczeń gazowych zwanego elektronicznym nosem (rys. 3). Przepływ próby gazowej zapewnia mikro-pompka membranowa FM1101 F6V Fürgut GmbH. Matryca czujników zlokalizowana jest w komorze pod przykrywą na przednim panelu analizatora. Po jej odkryciu istnieje możliwość wymiany lub rekonfiguracja czujników. Strumień gazu przepływa przez matrycę radialnie i omywa każdy czujnik równomiernie, przez co zminimalizowany jest wpływ pozostałych czujników na jakość badanej próbki gazów. Wyniki pomiarów i opcje sterowania i przedstawiane są na graficznym wyświetlaczu o wielkości 64×128 pikseli. Zastosowanie panelu dotykowego sprzężonego z wyświetlaczem umożliwia wygodne sterowanie poprzez wybieranie przycisków programowych. Wyniki pomiarów zapisywane są w postaci plików tekstowych na karcie pamięci SD/MMC z systemem zapisu FAT. Analizator umożliwia wykonywanie pomiarów zarówno w laboratorium jak i *in-situ* w terenie. Ponadto posiada funkcję pomiaru cyklicznego z ustawianym krokiem czasowym, co pozwala na jego zastosowanie w funkcji dataloggera przy wybranym źródle zanieczyszczeń powietrza. Wewnętrznym źródłem energii jest akumulator żelowy o pojemności 7,2 Ah. Wszystkie podzespoły analizatora sterowane są przez centralny mikrokontroler AVR Atmega128.



Rys. 3. Przenośny analizator zanieczyszczeń gazowych (elektroniczny nos) podczas wstępnego testowania

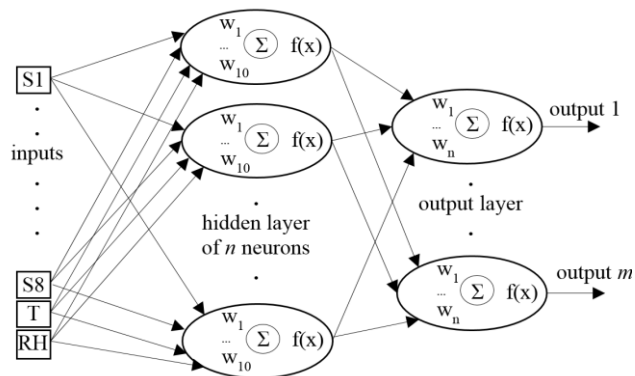
Мал. 3. Переносний аналізатор газових забруднень (електронний ніс) під час попереднього тестування

Do analizy danych został wykorzystany perceptron wielowarstwowy (MLP). Sieć składa się z 10 neuronów wejściowych (wszystkie czujniki), jednej warstwy z neuronami ukrytymi oraz warstwy wyjściowej z liczbą neuronów odpowiadającą liczbie stanów pracy bioreaktora (rys. 4). Architektura sieci została dobrana w celu maksymalizacji zdolności generalizacyjnych, przy jej minimalnej złożoności. Proces uczenia sieci neuronowej polega na zmianach wag poszczególnych neuronów w kierunku w którym następuje zmniejszanie sumarycznego błędu sieci. Początkowe wartości wag dobrane zostały losowo ze średnią  $w_{ij}=0$  i wariancją  $s=1$ .

Błąd sieci został wyznaczony za pomocą sumy kwadratów (SOS), a do uczenia sieci wykorzystano algorytm BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno). Z całego zbioru danych losowo został wybrany podzbiór uczący (70%), testowy (15%) i walidacyjny (15%). Proces uczenia był kończony gdy błąd sieci dla podzbioru testowego przewyższał błąd sieci dla podzbioru uczącego. Podzbiór walidacyjny wykorzystywany był do oceny jakości wyuczonych sieci.

діапазоном. Роль перетворювача ADC виконує мікроконтролер ADuC847 з 8 мультиплексованими входами 24-бітового перетворювача. Перетворювач ADC встановлений в наступних діапазонах: 20 мВ, 40 мВ, 80 мВ, 160 мВ, 320 мВ, 640 мВ, 1,28 В і 2,56 В.

Матриця газових датчиків з системою перетворення, складає головний елемент переносного аналізатора газоподібних забруднюючих речовин, і називається електронний ніс (мал. 3). Потік проби газу забезпечує мікро-мембранний насос FM1101 F6V Fürgut GmbH. Матриця датчиків розташована в камері під кришкою на передній панелі аналізатора. Після її виявлення є можливість заміни або реконфігурація датчиків. Газовий потік проходить через матрицю радіально і рівномірно омиває кожен датчик, тому вплив інших датчиків, на якість проби газів мінімальний. Варіанти управління і результати вимірювань представлені в графічному дисплеї розміром 64×128 пікселів. Використання сенсорної панелі в поєднанні з дисплеєм уможливорює керування, вибравши клавішою програму. Результати вимірювань зберігаються у вигляді текстових файлів на карті пам'яті SD/MMC з системою зберігання FAT. Аналізатор дозволяє виконувати вимірювання, як в лабораторії, так і *in-situ*. Також має функцію вимірювального циклу з регульованим кроком часу, що дозволяє його використовувати, як функцію реєстратора даних з обраним джерелом забруднення повітря. Внутрішнім джерелом енергії є гелевий акумулятор з ємністю 7.2 Ah. Всі компоненти аналізатора контролюються центральним мікроконтролером AVR Atmega128.



Rys. 4. Schemat sieci neuronowej zastosowanej do klasyfikacji stanów pracy bioreaktora

Мал. 4. Схема нейронної мережі для класифікації умов експлуатації біореактора

Для аналізу даних був використаний багатoshаровий перцептрон (MLP). Мережа складається з 10 вхідних нейронів (всі датчики), одного прихованого нейронного шару і вихідного шару нейронів кількість, яких відповідає числу станів роботи біореактора (мал. 4). Мережева архітектура була обрана, щоб максимізувати здатність генералізаційну з її мінімальною складністю. Процес навчання нейронної мережі полягає на зміні ваги окремих нейронів у напрямку, в якому зменшується сумарна мережева помилка. Початкові значення ваги вибираються випадковим чином із середнім  $w_{ij}=0$  і дисперсією  $s=1$ .

Мережева помилка була розрахована шляхом підсумовування квадратів (SOS), і для навчальної мережі був використаний алгоритм BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno). З цілого набору даних випадковим чином вибирається навчальна підмножина (70%), тестова (15%) і перевірки (15%). Процес навчання було припинено, коли помилка мережі, для тестової підмножини, перевищила помилку мережі, для навчальної підмножини. Підмножина перевірки була використана, для оцінки якості вивчених мереж.



## 2. Wyniki i ich analiza

Fragmety pomiarów rezystancji czujników matrycy przedstawione zostały na rys. 5. Z lewej strony wykresu znajduje się 36h wycinek z sygnałami uzyskanymi podczas prawidłowej pracy bioreaktora. Wszystkie cykle pracy bioreaktora charakteryzują się podobnym przebiegiem w czasie. Uzyskanie całkowicie identycznych charakterystyk jest niemożliwe, gdyż skład ścieków poddawanych oczyszczeniu zmieniał w pewnych granicach. Najniższe wartości rezystancji zaobserwowano w chwili aktywacji napowietrzania, kiedy następowała wzmożona emisja zanieczyszczeń z nieoczyszczonych ścieków. Najwyższe wartości rezystancji zarejestrowane były podczas przepłukiwania czujników czystym powietrzem. Wszelkie odstępstwa od typowych charakterystyk, takie jak w 8-dniowym wycinku pomiarów po prawej stronie rys. 5, świadczą o zakłóconej pracy bioreaktora lub o spadku skuteczności oczyszczania ścieków. W tym celu przeprowadzona została symulowana 3-dniowa awaria systemu napowietrzania, co stworzyło warunki do rozwoju bakterii beztlenowych. W chwili przywrócenia sprawności systemu napowietrzania, nastąpiło uwalnianie uciążliwych zapachowo gazów, będących efektem metabolizmu bakterii beztlenowych.

Na rys. 6 przedstawiona została podstawowa statystyka odczytów z wszystkich czujników rejestrowanych podczas całego doświadczenia, w rozbiciu na poszczególne etapy oczyszczania. W celu ujednolicenia wyników wyznaczona została rezystancja względna:

$$RR = R_S / R_O \quad (2)$$

gdzie:  $R_S$  – rezystancja [kΩ] czujnika podczas pomiaru fazy gazowej,  $R_O$  – rezystancja [kΩ] czujnika w atmosferze czystego powietrza. Ramka przedstawia zakres jednego odchylenia standardowego od wartości średniej ( $\overline{RR} \pm \sigma$ ), natomiast wąsy są to wartości minimalne  $RR_{min}$  i maksymalne  $RR_{max}$ . Z pośród wszystkich etapów cyklicznej pracy wyraźnie można odróżnić zakłócenia, charakteryzujące się niższą średnią rezystancją względną  $\overline{RR}$ . Etap przerwy działania reaktora charakteryzują się tym, iż minimalne i maksymalne odczyty są blisko zakresu  $\overline{RR} \pm \sigma$ . Etapy takie jak sedimentacja, mieszanie i napowietrzanie posiadają podobne konfiguracje sygnałów i ich rozróżnienie jest utrudnione.

W przypadku wyznaczenia sieci, które identyfikują każdy z etapów cyklu oczyszczania (dodanie nieoczyszczonych ścieków, przerwa, mieszanie, napowietrzanie z mieszaniem, napowietrzaniem cykliczne z mieszaniem, sedimentacja) oraz stany awaryjne, ich jakość uczenia oraz walidacji jest niska i mieści się w granicach 60-65%. Testy z samoorganizującymi się mapami Kohonena (SOM) wykazały, iż istnieje mniejsza ilość specyficznych klas, do których można przyporządkować poszczególne stany bioreaktora.

Istotną informacją z punktu widzenia prowadzonego procesu oczyszczania jest rozpoznanie czy proces przebiega prawidłowo, dlatego etapy pracy bioreaktora zostały zgrupowane do 4 ogólnych klas: (I) ścieki nieoczyszczone, (II) ścieki oczyszczone (III) czyste powietrze i (IV) stan awaryjny. Do klasyfikacji wybranych zostało pięć sieci MLP 10-20-4, każda zawiera jedną warstwę ukrytą z 20 neuronami oraz 4 neuronów wyjściowych. Szczegóły wybranych sieci przedstawione zostały w tab. 1. Funkcje aktywacji neuronów ukrytych to  $\tanh$  (tangens hiperboliczny) i  $\log$  (logistyczna sigmoid), natomiast neuronów wyjściowych  $\tanh$ ,  $\log$  oraz  $\text{lin}$  (funkcja liniowa). Średnia jakość walidacji wynosi 90,8%, co oznacza, iż sieci neuronowe z dużym prawdopodobieństwem są w stanie oceniać poszczególne stany pracy bioreaktora.

## 2. Результати та їх аналіз

Фрагменти вимірювання опору датчиків матриці показані на мал. 5. З лівої сторони діаграми знаходиться 36h відрізок з сигналами, отриманими під час нормальної роботи біореактора. Всі робочі цикли біореактора мають подібний часовий перебіг. Отримання повністю ідентичних характеристик неможливо, тому що склад стічних вод, які пройшли очистку змінювався в певних годинах. Найнижчі значення опору спостерігалися під час активації аерації, коли збільшувалися викиди з неочищених стічних вод. Найвищі значення опору були зареєстровані під час промивання датчиків чистим повітрям. Будь-які відхилення від типових характеристик, такі, як 8-денний проміжок вимірювань з правої сторони на мал. 5, вказують на порушення роботи біореактора або зменшення ефективності очищення стічних вод. З цією метою була проведена 3-денна імітаційна аварія системи аерації, це створило умови для розвитку анаеробних бактерій. Коли роботу системи аерації відновили, відбулося виведення шкідливих запахових газів, які були ефектом анаеробного метаболізму бактерій.

На мал. 6 представлена основна статистика даних з усіх датчиків зафіксована протягом усього експерименту з розбивкою на окремі етапи очистки. З метою уніфікації результатів була визначена відносна стійкість:

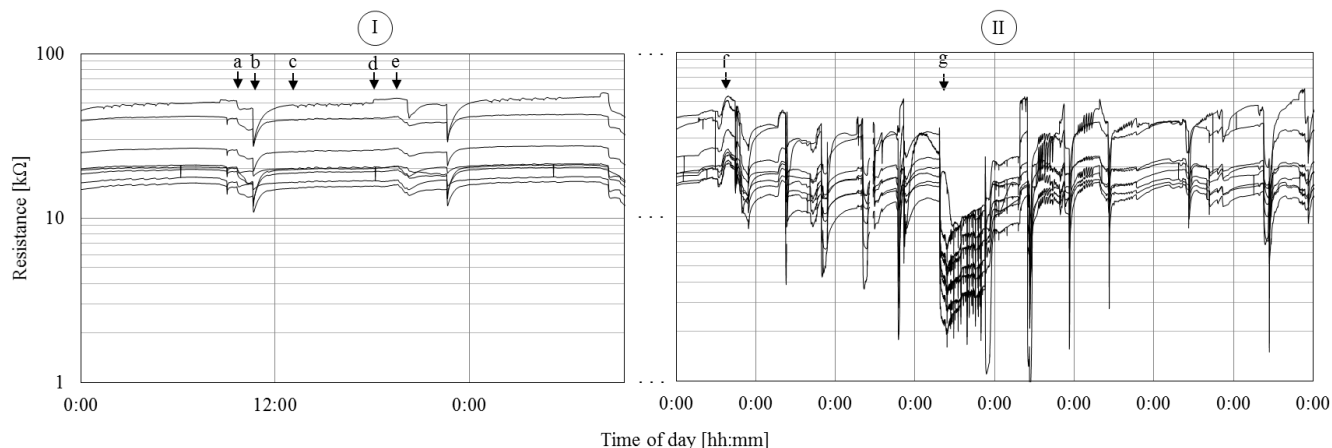
де  $R_S$  це стійкість [kΩ] датчика під час вимірювання газової фази, і  $R_O$  стійкість [kΩ] датчика в атмосфері чистого повітря. Кадр показує діапазон одного стандартного відхилення від середнього значення ( $\overline{RR} \pm \sigma$ ), а вуса це мінімальне значення  $RR_{min}$  та максимальне  $RR_{max}$ . З усіх етапів циклічної роботи чітко можна відрізнити шуми, які характеризуються більш низькою середньою відносною стійкістю  $\overline{RR}$ . Період паузи в роботі реактора характеризується тим, що мінімальні та максимальні показники близькі до  $\overline{RR} \pm \sigma$ . Такі заходи, як седиментація, вимішування та аерація мають схожі конфігурації сигналів і їх диференціація ускладнюється.

У випадку визначення мережі, яка ідентифікує кожен з етапів циклу очищення (додавання неочищених стічних вод, перерви, вимішування, аерація з перемішуванням, аерація циклічна з перемішуванням, відстоювання, продувки датчиків) та аварії, якість їх вивчання і перевірка є низькими і знаходяться в межах 60-65%. Випробування з самоорганізуючими картами Kohonena (SOM) показали, що існує менша кількість специфічних класів, до яких можна підпорядковувати окремі періоди біореактора.

Важливою інформацією, з точки зору поточного процесу очищення є визначення, чи процес протікає правильно, тому етапи роботи біореактора були згруповані в чотири основні класи: (I) неочищених стічних вод, (II) очищених стічних вод (III) чисте повітря і (IV) надзвичайний стан. Були відібрані для класифікації п'ять мереж MLP 10-20-4, кожна має один прихований шар нейронів з 20 нейронами і 4 вихідними нейронами. Інформація про обрані мережі, представлена в табл. 1. Функція активації прихованих нейронів  $\tanh$  (гіперболічний тангенс) і  $\log$  (логістична сигмоїда), у той час як вихідні нейрони,  $\tanh$ ,  $\log$  та  $\text{lin}$  (лінійна функція). Перевірка середньої якості складає 90,8%, це означає, що нейронні мережі, швидше за все, в змозі оцінити окремі періоди роботи біореактора.

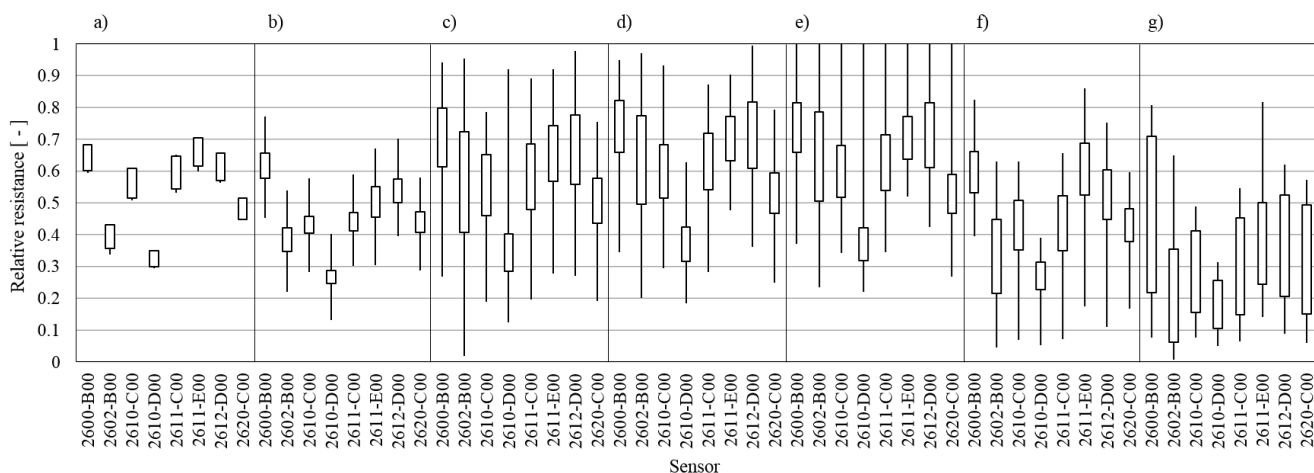
Tabela 1. Szczegóły wyznaczonych sztucznych sieci neuronowych do klasyfikacji  
Табл. 1. Відомості про набір штучних нейронних мереж для класифікації

Id sieci	Jakość uczenia	Jakość walidacji	Algorytm uczenia	Aktywacja ukryte	Aktywacja wyjściowe
Id мережа	Якість навчання	Перевірка якості	Алгоритм навчання	Активация прихована	Активация вихідна
1	95,03	91,58	BFGS 120	Tanh	Log
2	94,69	90,11	BFGS 144	Log	Tanh
3	95,59	90,09	BFGS 148	Log	Tanh
4	95,13	89,70	BFGS 136	Tanh	Lin
5	96,24	92,60	BFGS 142	Tanh	Lin



Rys. 5. Zmiany sygnały wszystkich czujników matrycy podczas normalnej pracy (I) oraz pracy z zakłóceniami (II): a) dodanie nieoczyszczonych ścieków i przerwa, b) napowietrzanie i mieszanie, c) napowietrzanie cykliczne i mieszanie, d) sedymentacja, e) przeczyszczanie czujników, f) początek zakłóconej pracy reaktora, g) uruchomienie reaktora po awarii

Мал. 5. Зміни в сигналах всіх датчиків матриці під час нормальної роботи (I) і роботи з перешкодами (II): а) додавання неочищених стічних вод і зупинка, б) аерація і змішування, с) циклічна аерація та змішування, д) осаження, е) продування датчиків, ф) початок порушеної роботи реактора, г) початок роботи реактора після аварії



Rys. 6. Statystyczne zestawienie odpowiedzi matrycy czujników (rezystancja względna RR) podczas poszczególnych faz oczyszczania: a) dodanie nieoczyszczonych ścieków i przerwa, b) napowietrzanie i mieszanie, c) napowietrzanie cykliczne i mieszanie, d) sedymentacja, e) przeczyszczanie czujników, f) początek zakłóconej pracy reaktora, g) uruchomienie reaktora po awarii. Wąsy: minimum ( $RR_{min}$ ) i maksimum ( $RR_{maks}$ ). Ramka: średnia  $\pm$  odchylenie standardowe ( $RR \pm \sigma$ )

Мал. 6. Статистичне зіставлення відповіді матриці датчиків (відносна стійкість RR) на різних етапах очищення: а) додавання неочищених стічних вод і зупинка, б) аерація і змішування, с) циклічна аерація та змішування, д) осаження, е) продування датчиків, ф) початок порушеної роботи реактора, г) початок роботи реактора після аварії. Вуса: мінімальна  $RR_{min}$  та максимальна  $RR_{maks}$ ; рамка: середня  $\pm$  стандартне відхилення  $RR \pm \sigma$

### 3. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania wskazują na to, iż do monitoringu procesów oczyszczania ścieków komunalnych w reaktorze SBR może zostać wykorzystana matryca czujników gazu typu MOS oraz sztuczne sieci neuronowe. Opisana metoda z dużym prawdopodobieństwem umożliwia identyfikację poszczególnych etapów pracy bioreaktora SBR, określonych jako: (I) ścieki nieoczyszczone, (II) ścieki oczyszczone (III) czyste powietrze i (IV) stan awaryjny.

Rozróżnienie etapów pracy takich jak napowietrzanie, mieszanie jest utrudnione ze względu na zbliżone charakterystyki sygnałów. Do dokładniejszej analizy pomocne mogłyby być parametry określające dynamiczną zmianę wartości rezystancji czujników.

Systemy wieloczujnikowe mogą zostać wykorzystane do ciągłego monitoringu pracy bioreaktora typu SBR, dając natychmiastowy sygnał o niewłaściwej jego pracy. Ze względu na to, że czujniki nie są zanurzone w agresywnym środowisku wodnym, ich trwałość jest zwiększona w stosunku do czujników immersyjnych.

### 3. Висновок

Проведені дослідження показують, що для моніторингу процесів очищення стічних вод в реакторі SBR може бути використана матриця газових датчиків типу MOS та штучні нейронні мережі. Описаний метод, ймовірно, дозволяє ідентифікувати різні етапи роботи біореактора SBR, визначені як: (I) неочищені стічні води, (II) очищені стічні води (III) чисте повітря і (IV) надзвичайний стан.

Важко розрізнити етапи роботи, такі як аерація, перемішування через подібні характеристики сигналів. Для більш детального аналізу можуть бути корисним параметри, що визначають динамічну зміну значень стійкості датчиків.

Системи, які мають багато датчиків можуть бути використані для безперервного контролю біореактора SBR, даючи миттєвий сигнал неправильної його роботи. У зв'язку з тим, що датчики не занурені в агресивне водне середовище, їх міцність зростає по відношенню до занурених датчиків.

## Podziękowania

Praca powstała w ramach projektu *PL-NTU Transgraniczna wymiana doświadczeń* PBU.03.01.00-06-386/11-00 współfinansowanego w ramach Programu Współpracy Transgranicznej Polska – Białoruś – Ukraina 2007–2013 finansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Instrumentu Sąsiedztwa i Partnerstwa.

Niniejsza publikacja została stworzona przy pomocy Unii Europejskiej. Wyłączną odpowiedzialność za zawartość niniejszej publikacji ponosi Łukasz Guz oraz w żaden sposób nie może być ona postrzegana jako odzwierciedlenie poglądów Unii Europejskiej.

## Literatura || Література

- [1] Arshak K., Moore E., Lyons G. M., J. Harris, Clifford S.: A review of gas sensors employed in electronic nose applications. *Sensor Review* 24(2)/2004, 181–198, [DOI: 10.1108/02602280410525977].
- [2] Bourgeois W., Burgess J.E., Stuetz R.M.: On-line monitoring of wastewater quality: a review. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 76, 2001, 337–348, [DOI: 10.1002/jctb.393].
- [3] Bourgeois W., Gardey G., Servieres M., Stuetz R. M.: A chemical sensor array based system for protecting wastewater treatment plants, *Sensors and Actuators B* 91 (1-3), 2003, 109–116, [DOI: 10.1016/S0925-4005(03)00074-1].
- [4] Bourgeois W., Stuetz R. M.: Use of a chemical sensor array for detecting pollutants in domestic wastewater. *Water Research* 36(18)/2002, 4505–4512, [DOI: 10.1016/S0043-1354(02)00183-5].
- [5] Capelli L., Sironi S., Centola P., Rosso R. D., Grande M. I.: Electronic noses for the continuous monitoring of odours from a wastewater treatment plant at specific receptors: Focus on training methods. *Sensors and Actuators B* 131(3)/2008, 53–62, [DOI: 10.1016/j.snb.2007.12.004].
- [6] Dewettinck T., Hege K. V., Verstraete W.: The electronic nose as a rapid sensor for volatile compounds in treated domestic wastewater. *Water Research* 35(10)/2001, 2475–2483, [DOI: 10.1016/S0043-1354(00)00530-3].
- [7] El-Din G.A., Smith D.W.: A neural network model to predict the wastewater inflow incorporating rainfall events. *Water Research* 36(5)/2002, 1115–1126, [DOI: 10.1016/S0043-1354(01)00287-1].
- [8] Guz Ł., Sobczuk H., Suchorab Z.: Pomiar odorów za pomocą przenośnego miernika z matrycą półprzewodnikowych czujników gazu, *Przemysł Chemiczny* 89 (4), 2010, 378–381.
- [9] Hecht-Nielsen R. H.: Kolmogorov's mapping neural network existence theorem, *Proceedings of the IEEE First International Conference on Neural Networks*, San Diego, 1987, 11–13.
- [10] Micone P. G., Guy C.: Odour quantification by a sensor array: An application to landfill gas odours from two different municipal waste treatment works. *Sensors and Actuators B* 120(2)/2007, 628–637, [DOI: 10.1016/j.snb.2006.03.026].
- [11] Nake A., Dubreuil B., Raynaud C., Talou T.: Outdoor in situ monitoring of volatile emissions from wastewater treatment plants with two portable technologies of electronic noses. *Sensors and Actuators B* 106(1)/2005, 36–39, [DOI: 10.1016/j.snb.2004.05.034].
- [12] Onkal-Engin G., Demir I., Engin S. N.: Determination of the relationship between sewage odour and BOD by neural networks. *Environmental Modelling & Software* 20(7)/2005, 843–850, [DOI: 10.1016/j.envsoft.2004.04.012].
- [13] Sironi S., Capelli L., Centola P., Del Rosso R., Grande M. I.: Continuous monitoring of odours from a composting plant using electronic noses. *Waste Management* 27/2007, 389–397, [DOI: 10.1016/j.wasman.2006.01.029].
- [14] Sohn J. H., Dunlop M., Hudson N., Kim T. I., Yoo Y. H.: Non-specific conducting polymer-based array capable of monitoring odour emissions from a biofiltration system in a piggery building. *Sensors and Actuators B* 135(2)/2009, 455–464, [DOI: 10.1016/j.snb.2008.10.007].
- [15] Stuetz R. M., Fenner R. A., Engin G.: Characterisation of wastewater using an electronic nose. *Water Research* 33(2)/1999, 442–452, [DOI: 10.1016/S0043-1354(98)00245-0].
- [16] Figaro USA INC., General information for TGS sensors, [www.figarosensor.com](http://www.figarosensor.com), 2005.

**Mgr inż. Łukasz Guz**  
e-mail: l.guz@pollub.pl

Łukasz Guz w roku 2007 otrzymał tytuł mgr inż. w Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Lubelskiej. Obecnie jest naukowo-dydaktycznym pracownikiem tej uczelni. Zajmuje się instrumentalnymi i sensorycznymi pomiarami zanieczyszczeń powietrza wewnętrznego i zewnętrznego. Ponadto prowadzi badania związane z ciepłotłokościowymi właściwościami materiałów budowlanych.



**Магістр інж. Лукаш Гуз**  
e-mail: l.guz@pollub.pl

Магістр інж. Лукаш Гуз в 2007 році закінчив факультет Інженерної Середовища в Люблінській Політехніці. Є науково-дидактичним співробітником даного університету. Займається практичним і сенсорним вимірюванням внутрішніх і зовнішніх забруднюючих речовин в повітрі.